

· 土木与建筑工程 ·

## 预填集料高强混凝土抗压强度影响因素研究

周孝军<sup>1,3</sup>, 谢琳<sup>1</sup>, 牟廷敏<sup>2,3</sup>, 彭建秋<sup>1</sup>, 范碧琨<sup>2,3</sup>

(1. 西华大学建筑与土木工程学院, 四川成都 610039; 2. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川成都 610041;  
3. 四川省钢管混凝土桥梁工程技术研究中心, 四川成都 610041)

**摘要:** 当前工程应用的预填集料混凝土其集料粒径大且组成单一, 混凝土强度偏低, 应用范围受限。为提高预填集料混凝土抗压强度, 本文试验研究制备方式、浆体材料类型、粗集料级配组成等对预填集料混凝土抗压强度的影响。结果表明: 分层填筑、振动灌浆比自填充灌浆更有利于提高预填集料混凝土抗压强度; 粗集料堆积程度越紧密、空隙率越小, 预填集料混凝土的抗压强度越高; 采用高流动性砂浆为灌浆料比用净浆为灌浆料制备的预填集料混凝土强度高; 利用非连续级配粗集料(10~20 mm: 20~25 mm=2: 8, 空隙率 37.0%)与高强高流动性砂浆(流动度 330 mm、28 d 抗压强度 72.2 MPa), 一次振动成型可制备出 28 d 抗压强度达 69.4 MPa 的预填集料高强混凝土。

**关键词:** 预填集料混凝土; 抗压强度; 高强混凝土; 浆体流动性; 粗集料级配

中图分类号: TU528.45 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2022)03-0099-07

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.4007

## Influencing Factors of Compressive Strength of Preplaced Aggregated High Strength Concrete

ZHOU Xiaojun<sup>1,3</sup>, XIE Lin<sup>1</sup>, MOU Tingmin<sup>2,3</sup>, PENG Jianqiu<sup>1</sup>, FAN Bikun<sup>2,3</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039 China;

2. Sichuan Highway Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610041 China;

3. Sichuan Steel Tube Concrete Bridge Engineering Technology Research Center, Chengdu 610041 China)

**Abstract:** The PAC used in the current project has large aggregate size and single composition, and concrete strength is low. Therefore, the engineering application of PAC is limited. In order to improve the compressive strength of prefilled aggregate concrete, the effects of preparation method, slurry material type and coarse aggregate gradation composition on the compressive strength of prefilled aggregate concrete were studied. The results show that vibration grouting and layered grouting contribute more to the strength of concrete than self-filling grouting. The closer the coarse aggregate accumulation degree is, the smaller the voidage is, and the higher the compressive strength of preplaced aggregate concrete is. The strength of PAC made with high fluidity mortar is higher than that made with clean slurry. Using discontinuous graded

收稿日期: 2021-04-18

基金项目: 四川交通科技项目(2014C-3); 西华大学自然科学基金重点项目(Z1420603); 西华大学研究生创新基金(SA2000002938)。

第一作者: 周孝军(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为高性能混凝土材料结构性能与工程应用。

ORCID: 0000-0003-3139-4957 E-mail: xjzhouedu@163.com

引用格式: 周孝军, 谢琳, 牟廷敏, 等. 预填集料高强混凝土抗压强度影响因素研究[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2022, 41(3): 99-105.

ZHOU Xiaojun, XIE Lin, MOU Tingmin, et al. Influencing Factors of Compressive Strength of Preplaced Aggregated High Strength Concrete[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2022, 41(3): 99-105.

coarse aggregate (10 ~ 20 mm : 20 ~ 25 mm = 2 : 8, voidage 37%) and high-strength and high-fluidity mortar (330 mm expansion, 28 d compressive strength of 72.2 MPa), the preplaced aggregate high-strength concrete with 28 d compressive strength of 69.4 MPa can be prepared by single vibration molding.

**Keywords:** preplaced aggregate concrete(PAC); compressive strength; high strength concrete; slurry fluidity; coarse aggregate gradatio

粗集料在混凝土中起骨架作用,是混凝土中强度最高、耐久性最佳、体积稳定性最好的结构组分,增加粗集料用量可以提高混凝土的各项性能<sup>[1-2]</sup>。常规混凝土是将胶凝材料与集料混合搅拌,为保证混凝土良好的工作性能,浆体量与集料空隙率之比一般大于 1.1<sup>[3]</sup>,集料悬浮于水泥浆体之中,其骨架作用不能充分发挥。预填集料混凝土是预先在模板内填筑粗集料,使集料呈嵌锁状<sup>[4]</sup>,然后注入高流动度的浆体材料,浆体量与集料空隙量基本一致。高体积分含量的粗集料呈紧密堆积状态<sup>[5]</sup>,使其弹性模量、抗氯离子渗透、抗冲击韧性、体积稳定性等性能在很大程度上优于常规混凝土<sup>[6]</sup>。此外,预填集料混凝土的粗集料预先置于模板中然后灌浆,浆体材料较常规混凝土搅拌方便,具有施工噪音小、振捣时间短、场地占用少、浆体用量省等优点,尤其适合钢筋密集、振捣不便的结构构件。

当前工程应用中预填集料混凝土的粗集料粒径一般在 50 ~ 200 mm,粗集料粒径偏大,级配组成单一,导致混凝土强度偏低,主要集中在 30 MPa 左右<sup>[7-12]</sup>。为提高预填集料混凝土强度,沈卫国等<sup>[13]</sup>开展了预填集料高强混凝土制备研究,通过调整砂浆配合比、掺入适宜的矿物掺合料制备了强度等级达 C50 的预填集料混凝土。Najjar 等<sup>[14]</sup>设计系列试验发现预填集料混凝土灌浆材料的性能与矿物掺合料的种类和用量有关。在此基础上,Cooper 等<sup>[15]</sup>进一步调整浆体材料配合比并掺入多种矿物掺合料,制备出了强度等级达 C60 的预填集料混凝土。

目前大部分研究中灌浆材料主要为砂浆,重点在调整砂浆灰砂比、水灰比以及胶凝材料组成<sup>[16]</sup>,关于制备方法、粗集料级配组成对预填集料混凝土强度影响的研究较少。因此本文研究不同制备方式、浆体材料类型及粗集料级配组成对预填集料混凝土抗压强度的影响,探讨其合理的制备方法与集料级配组成,以期制备出预填集料高强混

土,为工程应用提供支撑。

## 1 试验材料

1)水泥: P·O42.5 峨胜水泥,其主要技术指标见表 1。

表 1 水泥技术指标

密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
		3 d	28 d	3 d	28 d
3.09	387	5.9	8.0	26.8	46.1

2)粉煤灰: 泸州地博Ⅱ级粉煤灰,烧失量 4.98%,需水量比 102%。

3)细集料: Ⅱ区机制砂,细度模数 3.04。

4)粗集料: 破碎卵石、碎石,采用不同粒径范围的粗集料进行比例搭配而成,各粒径范围粗集料有 10 ~ 16 mm、10 ~ 20 mm、20 ~ 25 mm(单位粒级 16 ~ 25 mm,筛除粒径 19 mm 以下的集料)、20 ~ 31.5 mm(单位粒级 16 ~ 31.5 mm,筛除粒径 19 mm 以下的集料)、25 ~ 31.5 mm(单位粒级 16 ~ 31.5 mm,筛除粒径 26.5 mm 以下的集料)。

5)外加剂: 三瑞聚羧酸超塑化剂,减水率 35%。

## 2 试验与结果分析

### 2.1 制备方式及其对预填集料混凝土抗压强度的影响

试验研究 3 种不同制备方式对预填集料混凝土抗压强度的影响: 1)一次免振成型: 在立方体试模中预先用粗集料填平试模,然后注入浆体材料至满溢,表面抹平; 2)一次振动成型: 在立方体试模中预先用粗集料填平试模并振动 15 s,然后一边振动一边注入浆体材料至满溢,整个过程总振动时间控制在 1 min 之内,表面抹平; 3)二次振动成型: 在立方体试模中填入半数粗集料并振动 5 s,注入浆体材料至淹没集料,再用粗集料填平试模并振动 10 s,然后一边振动一边填入浆体材料至满溢,整个过程

总振动时间控制在 1 min 之内,表面抹平。二次振动成型流程如图 1 所示。

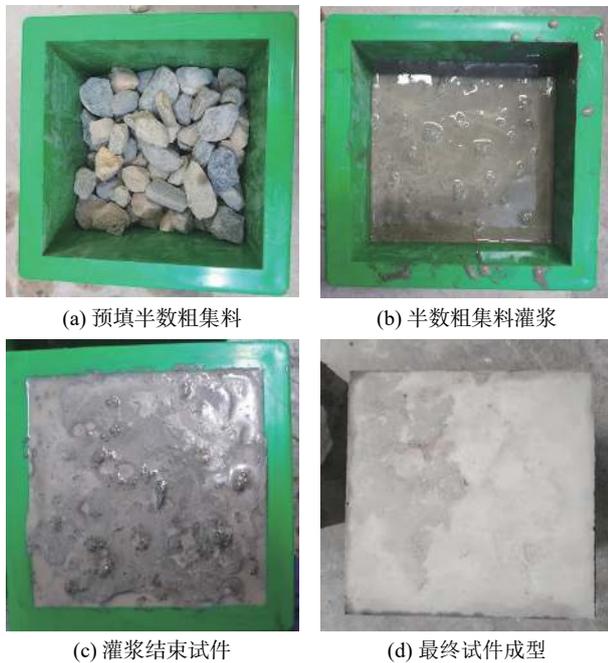


图 1 二次振动成型流程

预填集料混凝土配合比及相关性能指标见表 2。

由表 2 可知, A1、A2 组混凝土配合比相同, A2 组采用二次振动方法制备成型, 其 7、28 d 抗压强度均较一次振动成型的 A1 组强度高; 同样的, A3、A4 组混凝土配合比也相同, 其制备方式分别为一次免振、一次振动, A4 组混凝土 7、28 d 抗压强度也均较 A3 组抗压强度高。程运虹等<sup>[17]</sup>的研究也指出采用振动成型后, 预填集料混凝土强度等级可由 C30 提升到 C40。可见, 即便预填集料混凝土的浆体材料和粗集料级配相同, 其强度也会因为制备方式不同而有所差异。分层填筑、振动灌浆有利于提高预填集料混凝土抗压强度, 主要是因为

分层填筑使集料的分布以及骨架结构更合理, 振动填筑使混凝土的集料堆积状态更紧密, 提高了集料之间的机械咬合作用力, 使得制备的预填集料混凝土强度较高。虽然预填集料混凝土的浆体材料和粗集料级配相同的情况下, 采用二次振动方法制备的混凝土 7、28 d 抗压强度较一次振动成型的混凝土高, 但因为本文只是定性讨论制备方式、浆体材料类型、粗集料级配组成对预填集料混凝土抗压强度的影响; 因此, 下面的试验都采用一次振动成型的方法制备混凝土。

## 2.2 浆体材料类型对预填集料混凝土抗压强度的影响

浆体流动度测试方法根据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTGE30)中的方法进行, 净浆流动度用锥桶流出时间衡量, 砂浆流动度用扩展度衡量。浆体力学性能按照《水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法)》(GBT17671)的方法进行测试。预填集料混凝土力学性能根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081)的方法进行测试。浆体材料在预填集料混凝土中起着约束集料转动及位移的重要作用<sup>[18]</sup>, 不同浆体材料类型对预填集料混凝土粗集料的约束作用不同, 对其强度的贡献程度也不同<sup>[19]</sup>。净浆、砂浆是工程建设中常用灌浆材料, 根据前期试验结果, 分别选用锥桶倒流时间 26 s 的净浆与流动度为 330 mm 的砂浆采用一次振动成型方式制备预填集料混凝土, 混凝土外观均无露石。预填集料混凝土配合比如表 3 所示。

图 2 为砂浆、净浆混凝土抗压强度测试值, 由图 2 可知, 净浆、砂浆两类灌浆材料的 28 d 抗压强度基本一致(均在 57 MPa 左右), 但砂浆预填集料混凝土 28 d 抗压强度较净浆预填集料混凝土高约

表 2 预填集料混凝土配合比及相关性能指标

组别	浆体材料组分用量/(kg·m <sup>-3</sup> )				浆体材料性能指标			预填粗集料组分用量/(kg·m <sup>-3</sup> )		混凝土抗压强度/MPa		
	制备方式	水泥	粉煤灰	水	外加剂	流动度	抗压强度/MPa		级配设计	总用量	7d	28d
							7d	28d				
A1	一次振动	583	0	232	7	30s	46.3	58.8	10~16 mm : 25	1,695	31.3	42.7
A2	二次振动								mm~31.5 mm=2 : 8			
A3	一次免振	398	116	190	6	26s	44.9	56.9	10~20	1,685	34.3	47.0
A4	一次振动								mm : 20~31.5 mm=2 : 8			

表 3 预填集料混凝土配合比

组别	浆体材料组分量/(kg·m <sup>-3</sup> )					预填粗集料组分量/(kg·m <sup>-3</sup> )		
	浆体材料	水泥	粉煤灰	机制砂	水	外加剂	级配设计	总用量
B1	净浆	398	116	0	190	6	10~20 mm : 20~31.5 mm=2 : 8	1,716
B2	砂浆	270	101	429	126	4		

12 MPa。图 3 为砂浆、净浆预填集料混凝土的压碎破坏形态。由图 2 和图 3 分析可知:采用净浆填充于粗集料间隙时,整个混凝土集料体系中缺少细集料,集料体系空隙率较大;采用砂浆填充粗集料间隙时,其不仅较好黏结、约束了粗集料,而且使混凝土中整体集料体系级配空隙率较低,集料骨架作用发挥更充分,骨料之间的机械咬合力强,从而提升混凝土的强度。由此可见,采用砂浆为灌浆材料有利于提高预填集料混凝土的强度。

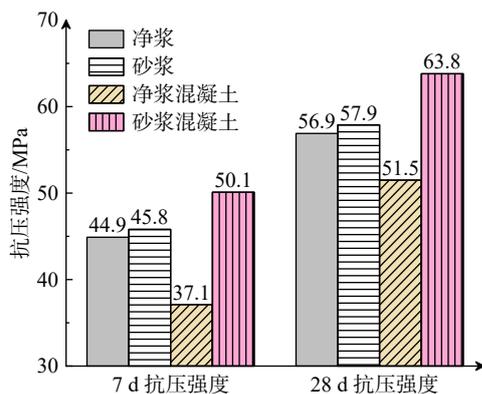


图 2 浆体类型对混凝土强度的影响



图 3 不同浆体类型混凝土的受压破坏形态

### 2.3 粗集料级配组成对预填集料混凝土抗压强度的影响

预填集料高强混凝土需要拥有紧密的堆积密度的粗集料体系来充分发挥其力学特性<sup>[20]</sup>;同时也需要降低粗集料体系的比表面积以减小浆体与集料的摩擦阻力从而保证其灌注密实性。为探讨其合理级配组成,此处选用 4 种不同级配粗集料,保证密实灌注的前提下,研究粗集料级配组成对预填集料混凝土抗压强度的影响。浆体材料采用流动度为 30 s 的净浆,7、28 d 抗压强度分别为 46.3、58.8 MPa,制备方式为一次振动,预填集料混凝土配合比及性能指标见表 4。

粗集料级配的振实空隙率根据《公路工程集料试验规程》(JTGE42)中 T0309 粗集料空隙率试验方法测定。各组试验的预填集料混凝土配合比中浆体的材料用量均根据成型试件时所消耗的实际材料按如下方法换算而得:

$$V_1 = \frac{m_1}{\rho}$$

$$V_2 = V_1 \times \frac{1000}{V_0}$$

$$m_i m_1 = M_i \times \frac{V_2}{1000}$$

式中: $m_1$  为灌浆前后单个试件质量差值,即所灌注浆体的质量(kg); $\rho$  为浆体表观密度( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ); $V_0$  为单个试件体积(L); $V_1$  为单个试件所需浆体体积(L); $V_2$  为每方预填集料混凝土所需浆体体积(L); $m_i$  为每方预填集料混凝土中各胶凝材料组分量( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); $M_i$  为每方浆体材料中各胶凝材料组分量

表 4 预填集料混凝土配合比及性能指标

组别	浆体材料组分量/(kg·m <sup>-3</sup> )			预填粗集料组分量/(kg·m <sup>-3</sup> )			混凝土抗压强度/MPa	
	水泥	水	外加剂	级配设计	总用量	空隙率/%	7d	28d
C1				级配①10~20 mm : 20~31.5 mm=2 : 8	1,708	35.6	34.3	48.1
C2				级配②10~16 mm : 25 mm~31.5 mm=2 : 8	1,687	36.8	31.3	43.2
C3	552	220	9	级配③10~20mm	1,699	36.1	27.5	37.4
C4				级配④20~25mm	1,574	40.7	25.0	33.6



图 4 级配组成对混凝土强度的影响

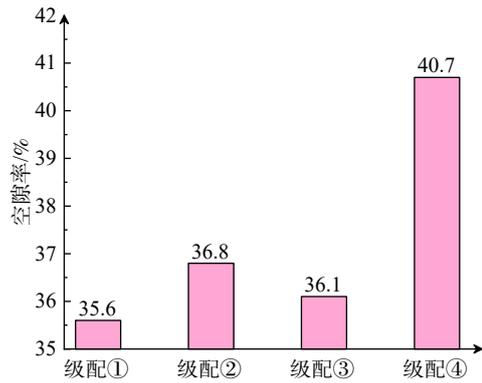


图 5 不同级配组成的空隙率

量( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )。

由图 4、图 5 可知,级配①—④的空隙率基本呈增加趋势,集料堆积紧密程度逐渐下降,制备的预填集料混凝土抗压强度逐渐降低。可见集料堆积紧密程度越高,其机械咬合作用就越强,混凝土强度就越高。同时,对比级配①与级配③,其空隙率相近,但级配①制备的混凝土 28 d 抗压强度较级配③高约 11 MPa,主要原因在于级配③属于单粒级配,粒级较少、粒径范围较小,集料相互之间

的机械咬合力较小,难以形成致密骨架结构。由此可见,预填集料混凝土不宜采用粒级较少、粒径范围较小的粗集料。

为进一步优化级配组成,试验采用 10~25 mm 非连续级配粗集料研究粗集料空隙率对预填集料混凝土抗压强度的影响。为提升混凝土强度,此处浆体材料采用流动度 330 mm 的砂浆,7、28 ds 抗压强度分别为 62.8、72.2 MPa,采用一次振动成型,预填集料混凝土配合比及相关性能指标见表 5。

表 5 预填集料混凝土配合比及相关性能指标

组别	浆体材料组 分用量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$					预填粗集料组 分用量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$			混凝土抗压强度/MPa	
	水泥	粉煤灰	机制砂	水	外加剂	级配设计	总用量	空隙率/%	7 d	28 d
D1						级配①10~20 mm : 20~25 mm=3 : 7	1,648	38.1	50.4	62.1
D2	258	65	374	112	4	级配②10~20 mm : 20~25 mm=2 : 8	1,668	37.0	55.3	69.4
D3						级配③10~20 mm : 20~25 mm=1 : 9	1,651	37.4	53.8	66.3

由表 5 以及图 6、图 7 可知,小石 (10~20 mm) 与大石 (20~25 mm) 的搭配比例由 3 : 7 到 2 : 8 再到 1 : 9 变化时,粗集料空隙率先减小后增大,混凝土 7、28 d 抗压强度均先增加再减小。小石 : 大石比例为 2 : 8 时,粗集料空隙率最小,同时还可以看到,此时粗集料的总用量最多,制备的预填集料混凝土强度最高,可达到 69.4 MPa,基本满足 C60 强度等级要求。可见,粒级组成相同的非连续级配粗集料,不同大、小石比例搭配时空隙率不同,集料堆积紧密程度有差异,堆积越紧密时材料用量越多,粗集料空隙率越小,集料的骨架作用发挥程度就越高。

级组成相同的情况下,应采用空隙率低的级配组合。考虑到集料的密度较浆体密度大,同一体积范围内填充粗集料越多,混凝土强度也越高,但应注意

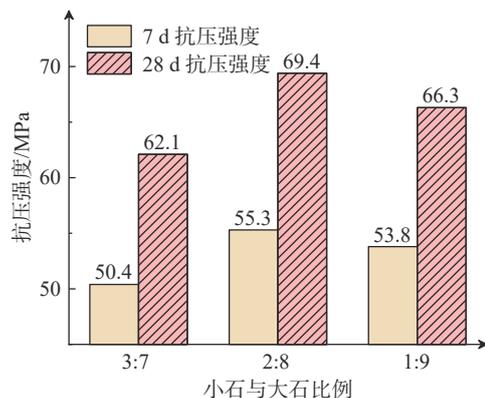


图 6 粒级比例对混凝土强度的影响

因此,制备预填集料高强混凝土时,粗集料粒

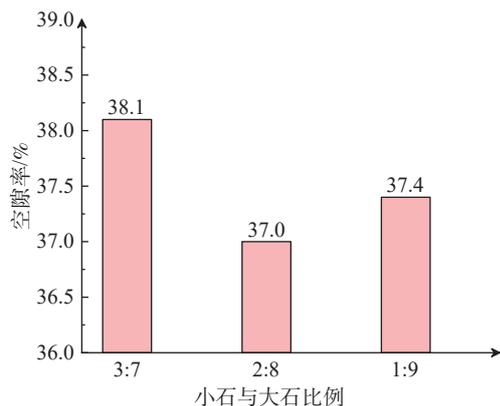


图7 不同粒径比例的空隙率

意低空隙率下要求浆体材料具备更高的流动性。

此外,从表5可知采用10~25 mm非连续级配粗集料(10~20 mm:20~25 mm=2:8,空隙率37%)与胶凝材料(水泥和粉煤灰)用量 $323 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、流动度330 mm、28 d强度72.2 MPa的砂浆,一次振动成型可制备出28 d抗压强度达69.4 MPa的预填集料高强混凝土。胶凝材料用量与该预填集料混凝土相近的常规混凝土,其强度等级约为C30<sup>[21]</sup>,由此可见采用预填集料的方法制备的混凝土胶材用量少,经济效益较高。

### 3 结论

通过系列试验研究,探明了不同成型方式、浆体材料类型、粗集料级配组成对预填集料混凝土抗压强度的影响,以及制备预填集料高强混凝土的相关技术要求。

1)其他参数与实验条件相同,二次振动比一次振动成型的混凝土7、28 d强度分别提高9.9%、11.5%;一次振动比免振成型的混凝土7、28 d强度分别提高8.2%、9.6%。振动灌浆、分层灌浆均较自填充灌浆更有利于提高预填集料混凝土抗压强度。

2)净浆与砂浆28 d抗压强度基本一致时(57 MPa左右),采用砂浆制备的预填集料混凝土28 d抗压强度较采用净浆高约12 MPa,可见浆体材料为砂浆时较净浆更利于提高预填集料混凝土抗压强度,但掺入细集料会降低浆体材料流动性。

3)预填粗集料最大粒径不大于31.5 mm时,粗集料的级配组成、粒径范围与空隙率对混凝土强度有不同程度的影响,采用10~20 mm或20~25

mm的单粒集配成型混凝土时,与非连续级配成型混凝土相比最大强度相差14.5 MPa。因此不宜采用粒径较少、粒径范围较小的粗集料。粗集料粒径组成相同时,集料空隙率越小,制备的预填集料混凝土抗压强度越高。

4)采用10~25 mm非连续级配粗集料(10~20 mm:20~25 mm=2:8,空隙率37%)与胶凝材料用量 $323 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、流动度330 mm、28 d强度72.2 MPa的砂浆,一次振动成型可制备出28 d抗压强度达69.4 MPa的预填集料高强混凝土,胶材用量少,经济效益较高。

### 参 考 文 献

- [1] BESHAR H, ALMUSALLAM A A, MASLEHUD-DIN M. Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2003, 17(2): 97 - 103.
- [2] KILIC A, TEYMEN A, OZDEMIR O, et al. Estimation of compressive strength of concrete using physico-mechanical properties of aggregate rock[J]. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering*, 2019, 43: 171 - 178.
- [3] 王大庆, 张翼, 任强, 等. 基于砂浆富余系数的C60机制砂自密实混凝土制备技术研究[J]. *新型建筑材料*, 2018, 45(6): 5 - 10.
- [4] 栾兰, 贾金青. 粗骨料嵌锁型混凝土研究进展综述[J]. *混凝土*, 2014(1): 35 - 37.
- [5] HONG L, GU X L, LIN F, et al. Effects of coarse aggregate form, angularity, and surface texture on concrete mechanical performance[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(10): 1 - 13.
- [6] LV J, ZHOU T H, LI K L. Development and investigation of a new low-cement-consumption concrete-preplaced aggregate concrete[J]. *Sustainability*, 2020, 12(3): 17 - 23.
- [7] 刘志勇. 预填骨料混凝土在惠生出运码头工程中的应用[J]. *邯郸职业技术学院学报*, 2013, 26(2): 42 - 44.
- [8] ABDELGADER H S, NAJJAR M F, AZABI T M. Study of underwater concrete using two-stage (preplaced aggregate) concrete in libya[J]. *Structural Concrete*, 2010, 11(3): 161 - 165.
- [9] DU Q, SU Q, LV J, et al. Use of preplaced casting

method in lightweight aggregate concrete[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017(6): 1 – 7.

[10] 康松涛, 李广森, 郁祝如. 水下预填骨料升浆混凝土的应用[J]. *中国港湾建设*, 2013(1): 65 – 68.

[11] 李松涛, 王向宇, 于鹏程. 机制砂代替河砂在预填骨料水下升浆混凝土中的应用[J]. *港工技术*, 2019, 56(1): 93 – 96.

[12] 甄正. 灌注砂浆的配制及其对预填骨料混凝土的影响 [D]. 汕头: 汕头大学, 2011.

[13] 沈卫国, 崔啸宇, 李家胜, 等. 预置集料高强高性能混凝土的实验研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2011, 33(10): 24 – 29.

[14] NAJJAR M F, SOLIMAN A M, NEHDI M L. Grouts incorporating supplementary cementitious materials for two-stage concrete[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(6): 9 – 18.

[15] COO M, PHEERAPHAN T. Effect of sand, fly ash, and coarse aggregate gradation on preplaced aggregate concrete studied through factorial design[J]. *Construction*

*and Building Materials*, 2015, 93: 812 – 821.

[16] NAJJAR M F, SOLOMAN A M, NEHDI M L. Critical overview of two-stage concrete: Properties and applications[J]. *Construction and Building Materials*, 2014(62): 47 – 58.

[17] CHENG Y H, LIU S, ZHU B, et al. Preparation of preplaced aggregate concrete and experimental study on its strength[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 229: 1 – 11.

[18] 宋承哲. 灌注砂浆及预填骨料混凝土的性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

[19] ABDELGADER H S, FEDIUK R S, KURPIN-SKA M, et al. Mechanical properties of two-stage concrete modified by silica fume[J]. *Magazine of Civil Engineering*, 2019, 89(5): 26 – 38.

[20] 武玲玲. 预置再生砖骨料灌浆泡沫混凝土性能研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.

[21] 胡佐平, 胡永梅. 高原冻土地区桩基混凝土配合比设计研究[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(1): 297 – 301.

(编校: 叶超)

(上接第 84 页)

[18] DICKENS J, LYON C, WILSON R. Effect of ultrasonic radiation on some physical characteristics of broiler breast muscle and cooked meat[J]. *Poultry Science*, 1991, 70(2): 389 – 396.

[19] 李兰会, 张志胜, 李艳琴, 等. 超声波在羊肉嫩化中的应用研究[J]. *食品科学*, 2005, 26(4): 107 – 109.

[20] 杨性民, 刘青梅, 罗海波, 等. 超声波结合嫩化剂对虾干嫩化效果的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(9): 267 – 269.

[21] 王清波, 张懋, 杨朝晖. 响应面法优化超声波辅助木瓜蛋白酶嫩化牛肉[J]. *山东农业科学*, 2018, 50(5): 136 – 142.

[22] 师文添, 丁玉勇, 吴婷婷, 等. 超声波协同复合嫩化剂对生鲜猪肉嫩度的影响[J]. *食品工业*, 2017, 38(5): 36 – 40.

[23] KAMPHUIS I G, DRENTH J, BAKER E N. Thi-ol proteases: Comparative studies based on the high resolution structures of papain and actinidin, and on amino acid sequence information for cathepsins B and H, and stem bromelain[J]. *Journal of Molecular Biology*, 1985, 182(2): 317 – 329.

[24] 周珠法. 响应面法优化木瓜蛋白酶嫩化牛肉工艺[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(2): 86 – 91.

[25] 明建, 李洪军. 不同酶嫩化处理对牛肉物性的影响[J]. *食品科学*, 2008, 29(12): 156 – 159.

(编校: 叶超)